

**О. В. КАЛЮЖНИЙ**, канд. тех. наук, ст. викл.; НТУУ "КПІ", Київ

## **ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТРАДИЦІЙНОГО ОБТИСКУ ТА ОБТИСКУ ЗАГОТОВОК З ДИФЕРЕНЦІЙОВАНИМ ПРОТИТИСКОМ**

Методом конечных элементов проведено математическое моделирование холодного традиционного обжима трубчатых заготовок из стали и обжима в условиях действия дифференцированного противодействия на внутреннюю поверхность заготовки. Определены конечная геометрическая форма изделий, усилия обжима, распределение удельных усилий на деформирующем инструменте, напряженно-деформированное состояние, степень использования ресурса пластичности металла и упрочнение металла после деформации. Проведено сравнение результатов моделирования. Приложение противодействия приводит к увеличению степени деформации при обжиме.

Методом скінчених елементів проведено математичне моделювання холодного традиційного обтиску трубчатих заготовок із сталі та обтиску в умовах дії диференційованого протитиску на внутрішню поверхню заготовки. Визначені кінцева геометрична форма виробів, зусилля обтиску, розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті, напружено-деформований стан, ступінь використання ресурсу пластичності металу після деформації. Проведене порівняння результатів моделювання. Прикладання протитиску приводить до збільшення ступеню деформації при обтиску.

The mathematical simulation of conventional squeezing of tubular workpiece made of steel and squeezing in conditions of differential counterpressure on the inner surface of workpiece were carried out by finite element method. Final geometry of products, squeezing force, specific forces distribution on the deforming tool, mode of deformation, degree of metal plasticity resource and strengthening of metal after deformation were determined. The comparison of simulation results were carried out. Application of counterpressure brings to increasing of degree of deformation during squeezing.

Обтиск трубчатих або порожнистих заготовок з дном широко розповсюджена формоутворююча операція листового штампування для виготовлення деталей балонів, перехідників для трубопроводів, ємностей для нагрівання води, гільз та інших. В результаті обтиску частина заготовки приймає форму конуса, циліндра і конусу, сфери, циліндра і сфери. Процес обтиску реалізують на кривошипних і гідравлічних пресах. При проектуванні технології обтиску в основному використовують дані з джерел [1-2]. Це стосується визначення, по-перше, основного показника - граничного коефіцієнта обтиску (відношення діаметра заготовки  $D$  по середині стінок до діаметра торця  $d$  обтиснутої заготовки також по середині стінок), а також висоти заготовки для обтиску, наближеного розрахунку зусилля та потовщення стінки заготовки після обтиску. При традиційному обтиску трубчатих заготовок без підпору стінок, як показали розрахунки [3], в залежності від відносної товщини стінки ( $S/D$ ) виникають дефекти у вигляді поперечних кільцевих складок на ділянці переходу обтиснутої конічної частини в циліндричну та на стінці заготовки, що підтверджено експериментальними даними [4]. На рис. 1 показані види дефектів, які виникають при обтиску без підпору стінок заготовки. Для виключення

вказаних дефектів використовують при обтиску жорсткі оправки. Однак, використання таких оправок приводить до виникнення сил тертя між оправками і металом, що деформується, та до збільшення зусилля обтиску. При обтиску порожнистих заготовок з дном використання вказаних оправок не можливе.

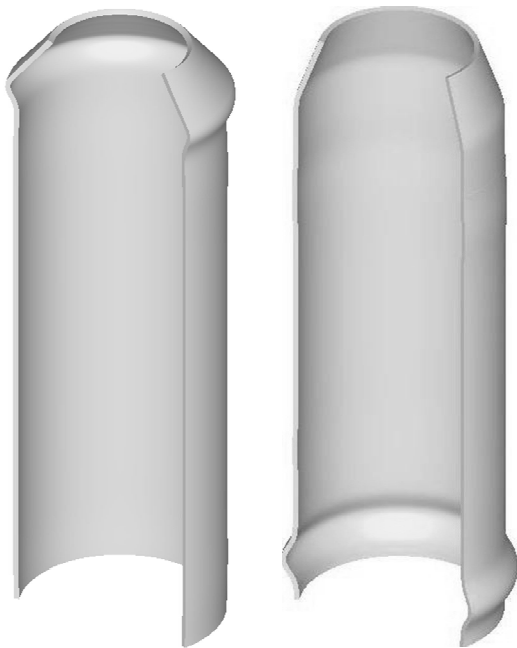


Рис. 1. Дефекти, які виникають при традиційному обтиску

Метою даної роботи є визначення розрахунковим шляхом з використанням методу скінченних елементів впливу диференційованого протитиску на стінки заготовки на коефіцієнт обтиску, силові режими, напружений стан металу, питомі зусилля на деформуючому інструменті та якість виробів.

На кафедрі механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів НТУУ «КПІ» при участі автора розроблені способи обтиску порожнистих заготовок з дном і трубчатих заготовок в умовах дії диференційованого протитиску на стінки заготовки при формоутворенні виробів [5]. Відмінність способів від існуючих полягає в тому, що протитиск створюється без додаткових приводів і пристроїв, причому

величина протитиску збільшується пропорційно зростанню зусилля обтиску (рис. 2). По схемі обтиску (рис. 2а) в рухомий контейнер з каналами діаметром  $d_1$  і  $d_2$ , який встановлений на опорі 2 з ущільненнями 3, заливають робочу рідину. В отвір опори 2 встановлений шток-виштовхувач 4, що має отвір для відводу повітря при розміщенні заготовки 5 (ліворуч від вісі симетрії). Зусилля  $P$  до заготовки 5 прикладають за допомогою штока 6. Під дією зусилля  $P$  заготовка опускається до штока-виштовхувача 4 з одночасним витиснення повітря через отвір в штоці-виштовхувачі 4, при цьому рідина з каналу діаметром  $d_1$  витискується в канал діаметром  $d_2$  і контейнер 1 рухається вгору (праворуч від вісі симетрії). Пружина 7 підтримує шток-виштовхувач 4 та прижимає до заготовки 5 при обтиску. При зростанні зусилля  $P$  створюється в рідині тиск  $q$ , що діє на внутрішню поверхню заготовки 5 та не дає втратити стійкість стінки при деформуванні. Величина тиску  $q$  при формоутворенні виробу залежить від зусилля  $P$ . Таким чином на заготовку діє диференційований протитиск  $q$ , величина якого пропорційна зростанню зусилля  $P$ . Виштовхування деталі виконується виштовхувачем 4.

Інша схема обтиску (рис. 2б) відрізняється тим, що нерухомий контейнер 1 з опорою 2 зафіксований на плиті 3 болтами 13. В контейнер 1 встановлена рухома ступінчата матриця 4, рухома втулка 5 з пружиною 6. В опору 2 і плиту 3 встановлений на пружину 7 шток-виштовхувач 8, який має отвір для відводу повітря. Зверху на контейнері 1 болтами 12 закріплене кільце 9. Порожнини діаметром  $d_1$  і  $D$  заповнюють робочою рідиною. Заготовку 10 розміщують в

рухомій втулці 5 до якої штоком 11 прикладають зусилля деформування  $P$ . Під дією зусилля  $P$  заготовка 10 опускається разом з рухомою втулкою 5 до штока-виштовхувача 8 з одночасним витисненням повітря через отвір у ньому. Пружина 6 необхідна для повертання у вихідне положення рухому матрицю 4 та рухому втулку 5. Рухома матриця 4 та опора 2 мають ущільнення 14. Вихідний стан перед обтиском показаний ліворуч від вісі симетрії.

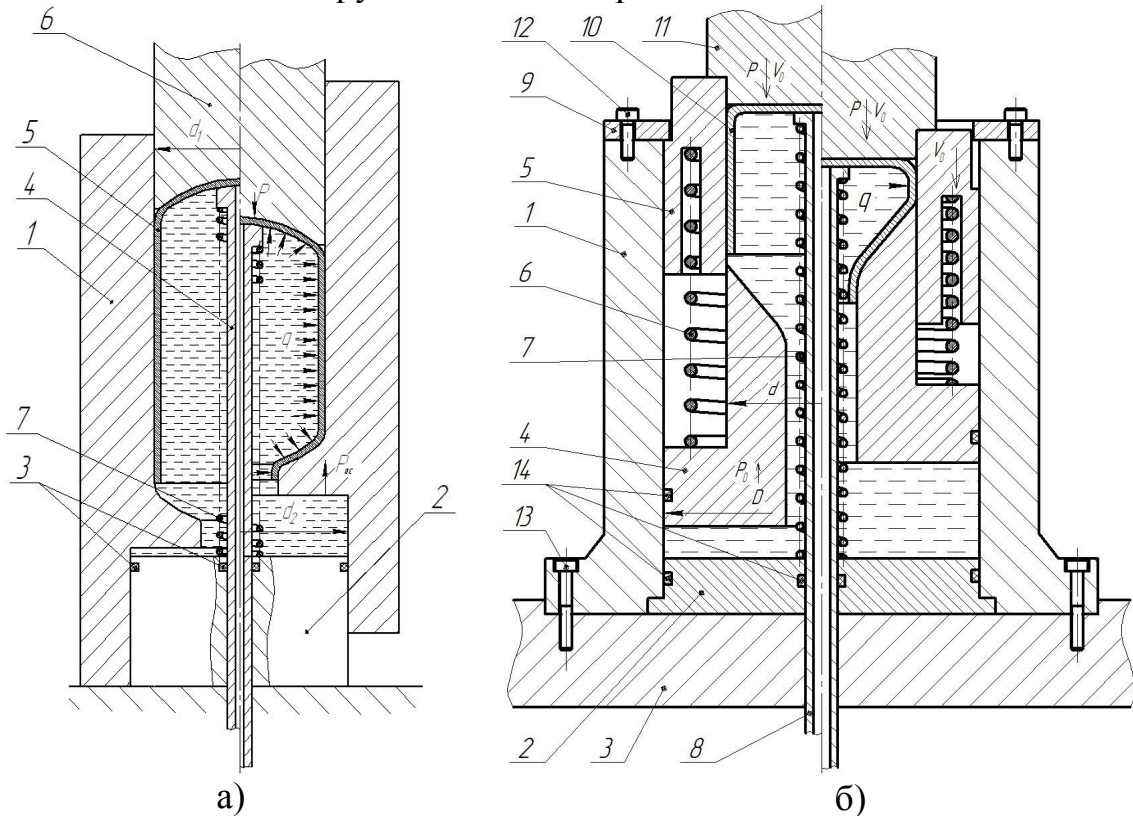


Рис. 2. Способи обтиску в умовах дії диференційованого протитиску на стінки заготовки

При опусканні штока 15 заготовка 10 перекриває канал в штоку-виштовхувачі 8 і в порожнинах діаметрами  $d_1$  і  $D$  під дією зусилля  $P$  створюється тиск  $q$ , що діє на внутрішню поверхню заготовки 10. Від тиску  $q$  за рахунок різниці площ порожнин матриця 4 починає рухатись вгору створюючи зусилля  $P_0$ . Таким чином на внутрішню поверхню заготовки 10 також діє диференційований протитиск, величина якого залежить від зусилля  $P$ . В свою чергу, рухома втулка 5 опускається вниз одночасно з заготовкою 10, при цьому виключається тертя на зовнішній поверхні заготовки 10 на відміну від попередньої схеми. Виключення тертя приводить до зменшення зусилля обтиску.

За допомогою методу скінченних елементів проведено моделювання процесів традиційного обтиску і обтиску в умовах дії диференційованого протитиску на внутрішню стінку трубчастої заготовки. Обтиску підлягала вісесиметрична трубчата заготовка діаметром 62 міліметри (мм), висотою 195 мм і товщиною 1,5 мм із маловуглецевої сталі. Задача розглядалася як вісесиметрична. Розрахункові схеми приведені на рис. 3. На рис. 3а показано: 1 - заготовка, 2 - контейнер, 3 - шток; на рис. 3б - заготовка 1, контейнер 2, шток 3, матриця 4. Враховано тертя на контактуючих поверхнях, зміцнення при

формоутворенні, швидкість деформування. Використана пружно-пластична модель. Моделювання виконувалось за допомогою ліцензійного пакету DEFORM. Розрахунок закінчували коли в нижній частині стінки заготовки виникало потовщення.

Кінцеві форми заготовок, які отримані моделюванням зображені на рис. 4. При традиційному обтиску діаметр обтиснутої частини складає 48 мм, потовщення стінки досягає 1,7 мм. При обтиску з диференційованим протитиском (максимальне значення протитиску 55 МПа в кінці обтиску) отримано: діаметр обтиснутої частини 38 мм, потовщення стінки 1,9 мм. В першому випадку досягнуто коефіцієнт обтиску 1,29, а в другому – 1,63. Таким чином, прикладання протитиску приводить до збільшення ступеню деформації в 1,3 рази. Залежність зусилля обтиску від переміщення штоку приведена на рис 5. При традиційному обтиску максимальне значення зусилля обтиску складає 250 КН, при обтиску з протитиском – 267 КН. Зростання зусилля склало 6,3 %. На рис. 6 показаний розподіл нормальних напружень на конічній поверхні здеформованої заготовки, яка контактує з матрицею. При традиційному обтиску розподіл нерівномірний. Має місце відставання заготовки від матриці на початку конічної поверхні матриці і в кінці. При обтиску з протитиском величини нормальних напружень збільшуються в 3 рази.

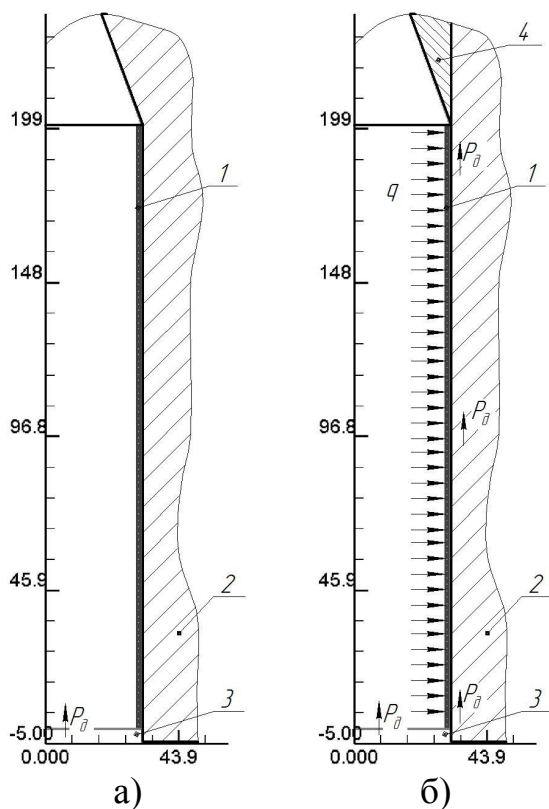


Рис. 3. Розрахункові схеми традиційного обтиску (а) і з протитиском (б). Розміри в міліметрах

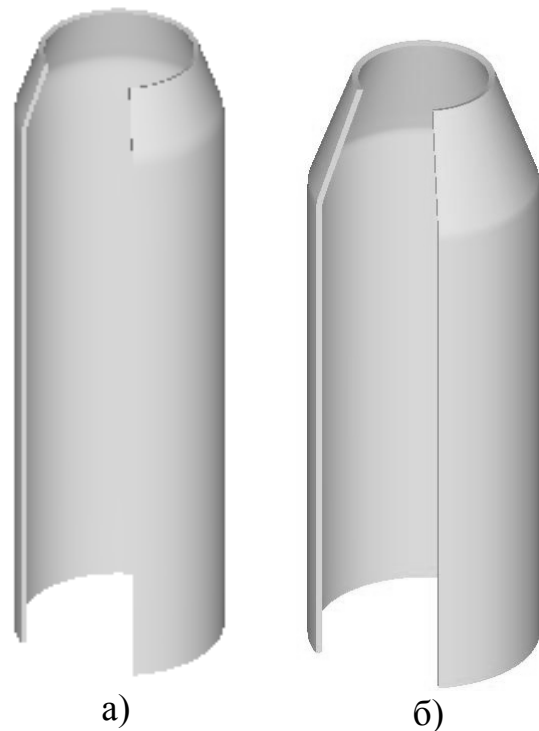


Рис. 4. Здеформовані заготовки в розрізі: а-традиційний обтиск, б-обтиск з протитиском

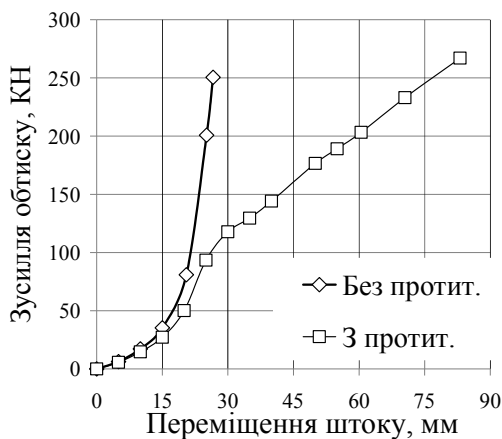


Рис. 5. Залежність зусилля обтиску від переміщення штоку

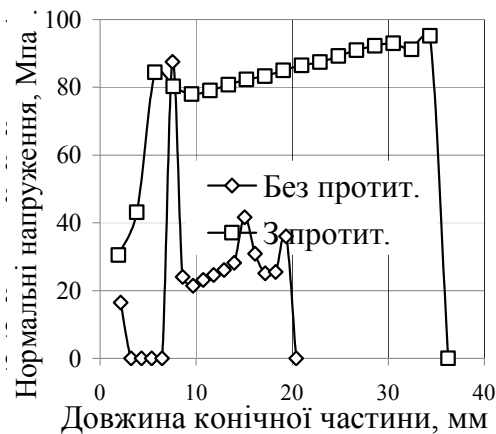


Рис. 6. Розподіл нормальних напружень на конічній поверхні

Прикладання протитиску приводить до збільшення радіальних напружень. Розподіл радіальних напружень на конічній поверхні заготовки, яка контактує з матрицею, зображений на рис. 7. Радіальні напруження стискаючі, прикладання протитиску приводить до зменшення значень напружень на кінці конічної частини.

Розподіли радіальних  $\sigma_r$ , осьових  $\sigma_z$  і тангенціальних  $\sigma_\theta$  напружень в здеформованій частині заготовок при традиційному обтиску і обтиску з протитиском приведені на рис. 8 (тонкими лініями показані контури конічної матриці). В верхній частині рисунка зображені вказані напруження при традиційному обтиску, в нижній – при обтиску з протитиском. Прикладання протитиску приводить до більш рівномірного розподілу і збільшення величин вказаних напружень, а також до повного заповнення профілю матриці в місці переходу циліндричної частини в конічну. Протитиск забезпечує виключення виникнення розтягувальних радіальних напружень в здеформованій частині заготовки і зменшення розтягувальних напружень  $\sigma_z$  в верхній частині заготовки. На ділянці переходу стінки заготовки в конус при обтиску з протитиском напруження  $\sigma_r$  і  $\sigma_\theta$  стискаючі, а при традиційному – розтягувальні, що приводить до утворення поперечних складок в середині заготовки.



Рис. 7. Розподіл радіальних напружень

Якість заготовок після обтиску можна оцінювати по пропрацюванню структури металу холодною пластичною деформацією, ступеню використання ресурсу пластичності та зміцненню здеформованого металу. На рис. 9 зображений розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$ , ступеня використання ресурсу пластичності  $\psi$  та інтенсивності напружень  $\sigma_i$  в здеформованій частині заготовок, які отримані при традиційному обтиску (верхній ряд рисунку) та при обтиску з протитиском (нижній ряд). Розподіли  $\epsilon_i$ , по якому оцінюється пропрацювання

структури металу пластичною деформацією, для обох обтисків практично однакові, однак при обтиску з протитиском  $\varepsilon_i$  досягає значення 0,56 (без протитиску 0,3). Аналогічний розподіл ступеня використання ресурсу пластичності  $\psi$ . Не дивлячись на те, що при обтиску з протитиском досягнуті значення інтенсивності деформацій в двічі більші, величини ресурсу пластичності  $\psi$  однакові. Величину зміцнення здеформованого металу можна оцінити по розподілу інтенсивності напружень  $\sigma_i$  в здеформованому металі і порівняти з умовною межею текучості  $\sigma_{0,2}$  металу в вихідному стані (для заготовок з маловуглецевої сталі  $\sigma_{0,2}=280$  МПа). При традиційному обтиску на початку конусної частини заготовки  $\sigma_i=340$  МПа на кінці -  $\sigma_i=460$  МПа. Відповідно метал зміцнюється в 1,2 і 1,64 рази в порівнянні з вихідним станом. При обтиску з протитиском на початку конусної частини заготовки  $\sigma_i=500$  МПа на кінці -  $\sigma_i=570$  МПа. Метал зміцнюється відповідно в 1,78 і 2 рази.

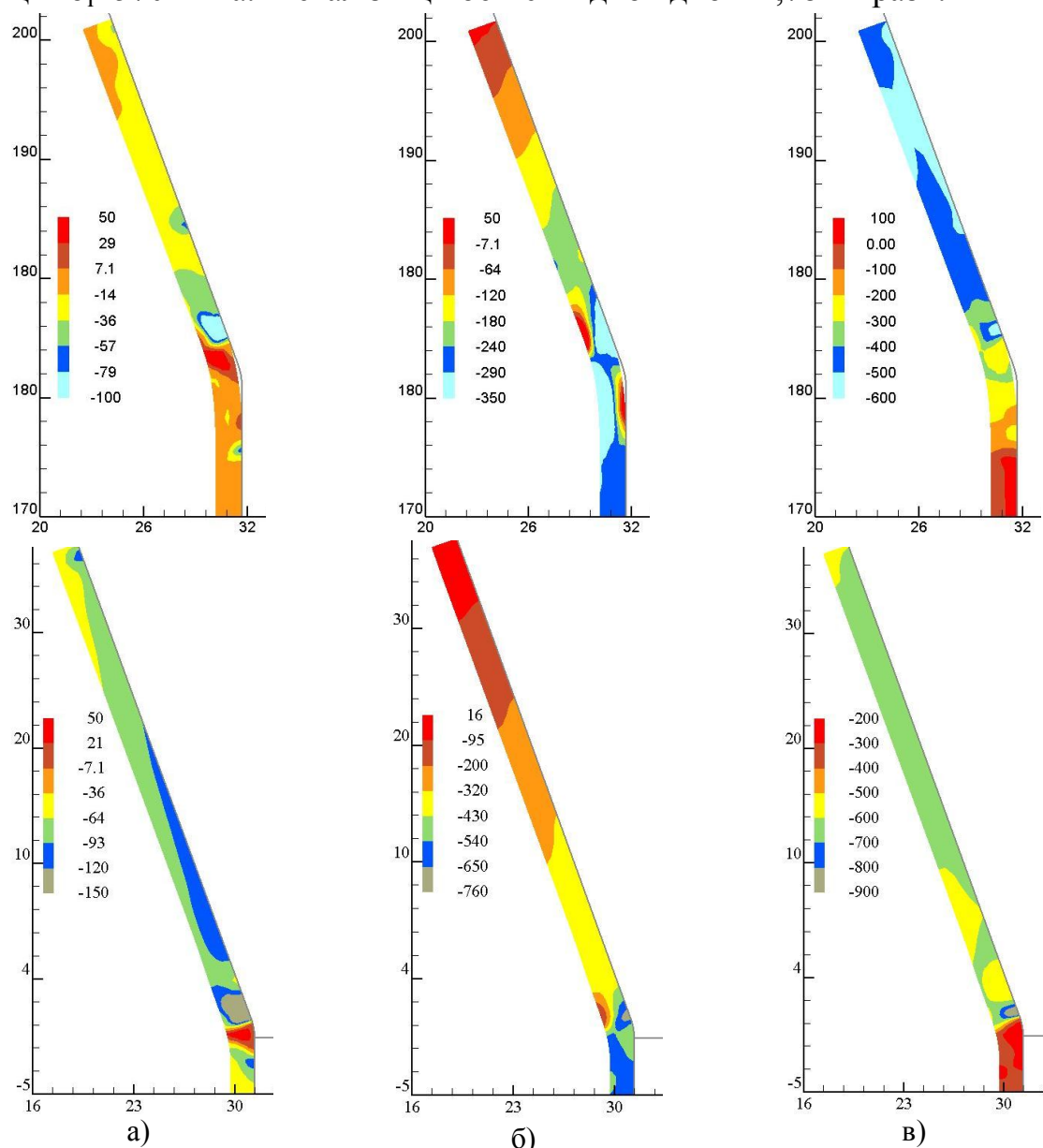


Рис. 8. Розподіли напружень в здеформованій частині заготовок (розміри по осях в міліметрах) : а- радіальних  $\sigma_r$ , б - осьових  $\sigma_z$ , в – тангенційних  $\sigma_\theta$



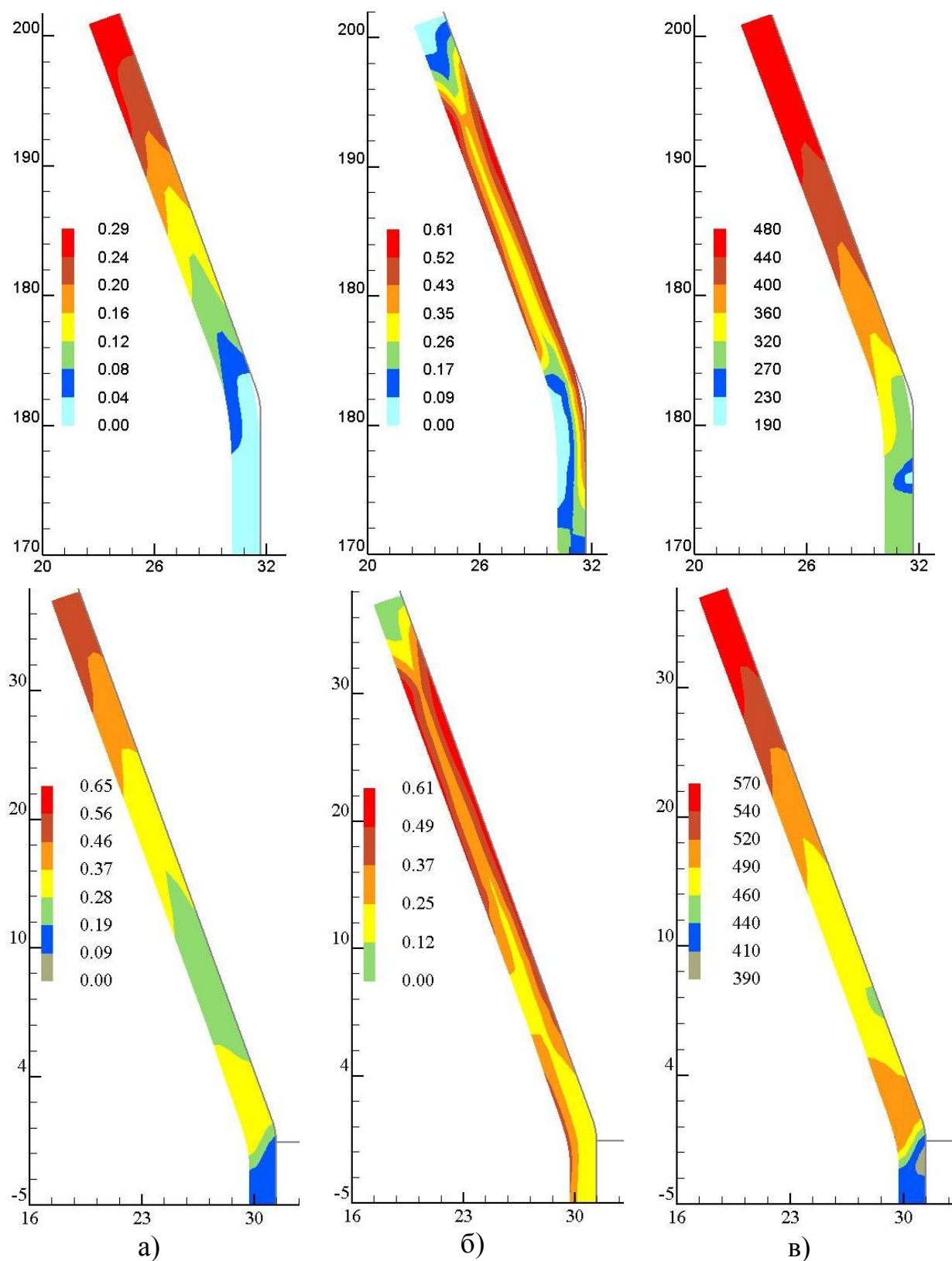


Рис. 9. Розподіли інтенсивності деформацій  $\epsilon_i$  (а), ресурсу пластичності  $\psi$  (б) і інтенсивності напружень  $\sigma_i$  (в) в zdeформованій частині заготовок (розміри по осях в міліметрах)

**Висновки.** Розроблені способи обтиску з прикладанням диференційованого протитиску на внутрішню стінку порожнистих заготовок з дном і трубчатих заготовок. Методом скінченних елементів проведений порівняльний аналіз

традиційного обтиску і обтиску з протитиском. Встановлено, що прикладання протитиску, в порівнянні з традиційним обтиском, забезпечує: збільшення ступеню деформації за один перехід; виключення виникнення розтягувальних напружень при формоутворенні виробів і зменшення вірогідності утворення дефектів у вигляді поперечних складок; більш інтенсивне і рівномірне пропрацювання структури металу пластичною деформацією; більше зміцнення zdeформованого металу заготовок.

**Список літератури:** 1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке// Романовский В.П. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с. 2. Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 4 Листовая штамповка/ Под ред.. А.Д. Матвеева; Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1985-1987. – 544 с. 3. Калюжний О.В. Аналіз силових режимів та якості виробів при обтиску трубчатих заготовок в конусній матриці//Вісник НТУУ «КПІ», серія Машинобудування, 2011, вип. 62. С. 63-67. 4. Аверкиев Ю.А. Холодная штамповка// Аверкиев Ю.А. ; Издательство Ростовского университета , 1984, - 288 с. 5. Калюжний В. Л. Спосіб обтиску горловини типу балон: пат. України №59190: МПК В21В26/02// Калюжний В. Л., Калюжний О. В., Піманов В. В., Паляничко Є. М.; Заявник і патентовласник НТУУ „КПІ”; Опубл. 10.05.2011, бюл. № 9.

## УДК 621. 7

**В. Л. КАЛЮЖНИЙ**, докт. техн. наук, проф.; НТУУ "КПІ", Київ

**В. В. ПІМАНОВ**, асп.; НТУУ "КПІ", Київ

**М. В. ОРЛЮК**, канд. техн. наук, доц.; НТУУ "КПІ", Київ

### **ХОЛОДНЕ ВИДАВЛЮВАННЯ СТУПІНЧАТИХ ПОРОЖНИН ПРЕСФОРМ ІЗ СТАЛІ 12ХН3А В УМОВАХ ДІЇ ДИФЕРЕНЦІЙОВАНОГО ПРОТИТИСКУ НА ЗАГОТОВКУ**

Методом конечных элементов проведено математическое моделирование холодного выдавливания ступенчатых полостей прессформ из стали 12ХН3А в условиях действия дифференцированного противодействия на внеконтактную поверхность заготовки. Определены усилия выдавливания, распределение удельных усилий на деформирующем инструменте, напряженно-деформированное состояние, степень использования ресурса пластичности металла и конечные размеры полости. Проведены эксперименты по выдавливанию ступенчатых полостей.

Методом скінчених елементів проведено математичне моделювання холодного видавлювання ступінчатих порожнин пресформ із сталі 12ХН3А в умовах дії диференційованого протитиску на позаконтактну поверхню заготовки. Визначено зусилля видавлювання, розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті, напружене-деформований стан, ресурс використання пластичності металу і кінцеві розміри порожнини. Проведено експерименти по видавлювання ступінчатих порожнин.

The mathematical modeling of cold forging of stepped die cavity made of steel 12ХН3А in conditions of differentiated back pressure on the out-of-contact surfaces of workpiece was carried out by finite element method. Loads, specific loads of forging, mode of deformation, resource of metal plasticity and finite dimensions of forged cavity were determined. The experiment of forging of stepped cavity was performed.